

Opinnäytetyö (AMK)  
Elektroniikan koulutusohjelma  
Elektroniikkasuunnittelu  
2014

Matias Tenhunen

# VAHVISTIN KOTIKAIUTTIMELLE



**TURUN AMMATTIKORKEAKOULU**  
TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Matias Tenhunen

## VAHVISTIN KOTIKAIUTTIMELLE

Tässä opinnäytetyössä suunniteltiin ja rakennettiin D-luokan audiovahvistin, joka asennettiin erään subwoofer-kaiuttimen kotelon sisään kotikäyttöä varten.

D-luokan vahvistimen etuina AB-luokan vahvistimeen nähden on korkea hyötysuhde erilaisen toimintaperiaatteen ansiosta. Vahvistin ei tarvitse suuria jäähdytyslementtejä, joten laite mahtuu pienempään tilaan.

Ensimmäiseksi opinnäytetyössä perehdyttiin perinteisten vahvistintyyppien ja D-luokan vahvistimen toimintaperiaatteisiin ja verrattiin D-luokan vahvistimen vahvuuksia ja heikkouksia AB-luokan vahvistimeen.

Vahvistin mitoitettiin  $6\ \Omega$ :n kaiutinelementille, jolle ilmoitettiin  $30\ \text{W}$ :n tehonkesto. Vahvistimesta haluttiin mahdollisimman laadukas, joten kytkentä suunniteltiin ja rakennettiin käyttämään Texas Instrumentsin TPA3118D2-vahvistinpiiriä. Ennen piirilevyn laatimista vahvistinpiirin toimintaa tutkittiin valmistajan tarjoamalla simulaatio-ohjelmalla. Valmistaja lupaa piirille  $2 \times 30\ \text{W}$ :n tehon  $8\ \Omega$ :iin eli  $60\ \text{W}$   $4\ \Omega$ :iin yhdelle kanavalle. Vahvistimeen ei rakennettu jakosuodinta, joten kytkentää voisi käyttää muidenkin kuin bassotaajuuksien vahvistamiseen. Teholähteenä käytettiin valmista, kaupallista  $24\ \text{V}$ :n hakkuriteholähdettä.

Valmista vahvistinta mitattiin laboratoriossa sekä yksinään että subwooferiin liitettynä. D-luokan vahvistin suoriutui mittauksista ja äänenlaatu oli hyvä, ja tavoitteeseen päästiin eli saatiin rakennettua toimiva vahvistin.

### ASIASANAT:

vahvistimet, D-luokka, subwoofer, PWM

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Electronics | Electronics design

2014 | Number of pages: 32

Instructors Ville Huhtinen B.Eng., Timo Tolmunen, D.Sc.

Matias Tenhunen

## CLASS D AMPLIFIER FOR HOME USE

In this thesis a class D audio amplifier was designed and built. The amplifier circuit board was then installed inside the enclosure of a subwoofer for use at home.

The principal advantage of a class D amplifier compared to a classic class AB amplifier is the higher efficiency of the amplifier due to a different operating principle. A class D amp needs no large heat sinks, which results in a smaller physical size of the device.

Initially, the ideas behind the operation of both class AB and D amplifiers were examined. The advantages and disadvantages of the class D amp were then compared to the more traditional class AB.

The amplifier was designed to be used with a 6  $\Omega$  woofer that had a 30 W power rating. The goal was to design and build a quality amplifier, so the circuit board was designed and built to use the Texas Instruments audio amplifier IC TPA3118D2. Before the circuit board was designed, the operation of the IC in question was simulated with a SPICE program and model provided by the manufacturer. Texas Instruments advertises 2  $\times$  30 W of power for the amplifier into 8  $\Omega$ , which means 60 W of power into a speaker of 4  $\Omega$  in a single channel. A crossover filter was not built for the amp. Therefore the device could be used to amplify audio not just in the lower frequencies, but also for the whole audible spectrum. The power supply used was a commercially available 24 V switching power supply.

Upon completion, the amplifier was measured in the lab, both by itself and attached to the subwoofer. The amplifier performed well in the measurements, and the sound quality was good. The thesis achieved its goal, that is, to design and build a working amplifier to be installed into the speaker enclosure.

### KEYWORDS:

amplifiers, class D, subwoofer, PWM

# SISÄLTÖ

## KÄYTETYT LYHENTEET

<b>1 JOHDANTO</b>	<b>1</b>
<b>2 VAHVISTIMISTA</b>	<b>2</b>
2.1 A-luokka	2
2.2 B-luokka	3
2.3 AB-luokka	3
2.4 D-luokka	4
2.4.1 Siltakytkennät	6
2.4.2 Särö	8
<b>3 SUBWOOFER</b>	<b>9</b>
3.1 Kaiuttimesta	9
3.2 Työssä käytettävä kaiutin	9
<b>4 SUUNNITTELU</b>	<b>11</b>
4.1 Piirin valinta	11
4.2 Simulaatio	12
4.2.1 Transient-simulaatio	14
4.2.2 Taajuusvaste	15
4.2.3 THD	16
4.3 Toimintojen määrittely	17
4.4 Piirikaavion laatiminen ja layoutin suunnittelu	17
4.5 Piirilevyn valmistus ja kokoaminen	20
<b>5 MITTAUKSET</b>	<b>22</b>
5.1 Transient	22
5.2 THD+N	24
5.3 Kohina	25
5.4 Amplitudivaste	26
5.5 Vaihevaste	26
5.6 Hyötysuhdemittaus	27

5.7 Subwooferin vaste	28
<b>6 YHTEENVETO</b>	<b>31</b>
<b>LÄHTEET</b>	<b>32</b>

## KUVAT

Kuva 1. A-luokan vahvistin. [1]	2
Kuva 2. B-luokan vahvistimen ylimenosärö. [3]	3
Kuva 3. D-luokan vahvistimen lohkokaavio. [1]	4
Kuva 4. PWM-esimerkki. [2]	5
Kuva 5. Vahvistinluokkien hyötysuhteet. [2]	6
Kuva 6. Puolisiltakytkentä. [4]	7
Kuva 7. Kokosiltakytkentä. [2]	7
Kuva 8. 4. asteen kaistanpäästökotelo. [6]	9
Kuva 9. Subwooferin amplitudivaste. [7]	10
Kuva 10. Vahvistinkytkentä yhdelle kanavalle. [7]	12
Kuva 11. TPA3118D2-kytkentä TINA-TI-ohjelmassa.	13
Kuva 12. PWM-moduloitu signaali, ulostulojännite ja sisääntulojännite TINA-TI:n transient-simulaatiossa.	14
Kuva 13. Vahvistimen taajuusvaste. [7]	15
Kuva 14. Valmistajan mittaama $THD+N$ . [7]	16
Kuva 15. Piirikaavio.	18
Kuva 16. Piirilevyn molemmat puolet.	20
Kuva 17. Valmis piirilevy.	21
Kuva 18. Ensimmäinen transient-mittaustulos.	22
Kuva 19. Toinen transient-mittaustulos.	23
Kuva 20. Transient-mittauksen FFT-muunnos.	23
Kuva 21. $THD+N$ -mittaus.	24
Kuva 22. Kohinamittaus.	25
Kuva 23. Vahvistimen amplitudivaste.	26
Kuva 24. Vahvistimen vaihevaste.	27
Kuva 25. Hyötysuhde lähtötehon funktiona	28
Kuva 26. Subwooferin ja vahvistimen mitattu taajuusvaste.	29
Kuva 27. Subwoofer kotikäytössä.	29

## KÄYTETYT LYHENTEET

$C$	kapasitanssi, kondensaattori
$f$	taajuus
$L$	induktanssi, kela
$N$	kohina (noise)
$P$	teho
$\eta$	hyötysuhde
EMI	sähkömagneettiset häiriöt (Electromagnetic interference)
IC	integroitu piiri (integrated circuit)
MOSFET	metallioksidi-puolijohdekanavatransistori (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)
PBTL	useamman vahvistimien rinnakkaiskytkentä sillattuun kuormaan (Parallel bridge tied load)
PDM	pulssintiheysmodulaatio (Pulse-density modulation)
PWM	pulssinleveysmodulaatio (Pulse-width modulation)
$PSRR$	kytkennän kyky hylkiä virtalähteeltä tulevia häiriöitä tai jännitevaihteluja (Power supply rejection ratio)
RCA	vakiintunut tiettyä ääniliitännää tarkoittava termi (Radio Corporation of America)
SMD	pintaliitoskomponentti (Surface-mount device)
SPICE	sähköisten piirien simulaatio-ohjelma (Simulation Program With Integrated Circuit Emphasis)
$THD$	kokonaisharmoninen särö (Total harmonic distortion)

# 1 JOHDANTO

Tässä opinnäytetyössä toteutetaan vahvistin passiiviselle subwoofer-kaiuttimelle. Tarkoitus on valmistaa toimiva aktiivinen subwoofer, joka voidaan liittää kaupalliseen virittinvahvistimeen. Aktiivisessa kaiuttimessa vahvistin on rakennettu kaiutinkotelon sisään. Subwoofer oli lojunut käyttämättömänä pitkään, ja työn lähtökohtana oli sen valmistaminen hyödylliseen käyttöön: täydentämään kodin äänentoistoa bassotoiston osalta.

Vahvistinluokalla tarkoitetaan audiovahvistimen pääteasteen rakennetta. D-luokan vahvistimella on muihin vahvistintyyppeihin verrattuna korkea hyötysuhde. Toimintatansa takia vahvistimen lämmöntuotto on pientä, joten tilaa vieviä jäähdytyslementtejä ei tarvita. Yksi D-luokan eduista onkin juuri laitteen pieni koko, mikä palvelee tätä työtä hyvin, sillä vahvistin oli tarkoitus mahduttaa subwooferin kaiutinkotelossa olevaan pieneen tilaan.

Turun ammattikorkeakoulussa on tehty ainakin yksi D-luokan vahvistimeen liittyvä opinnäytetyö (Karjala 2011). Opinnäytetyössä rakennettiin vahvistin lähinnä laboratoriokäyttöön ja pienemmälle teholle. Vahvistimen mitattu suorituskky oli kuitenkin rohkaiseva tätä työtä ajatellen.

D-luokan vahvistin on monimutkainen toteuttaa erilliskomponenteilla. Eri valmistajilta on saatavilla useita eri tehoisia, kompakteja D-luokan vahvistimia IC-piireinä, jotka tarvitsevat vain joitakin komponentteja ympärilleen toimiakseen. Aiempien opinnäytetöiden tutkimisen jälkeen vahvistin päätettiin rakentaa tällaista piiriä käyttäen ja teholahteenä käytettäisiin valmista kaupallista hakkuriteholähdettä.

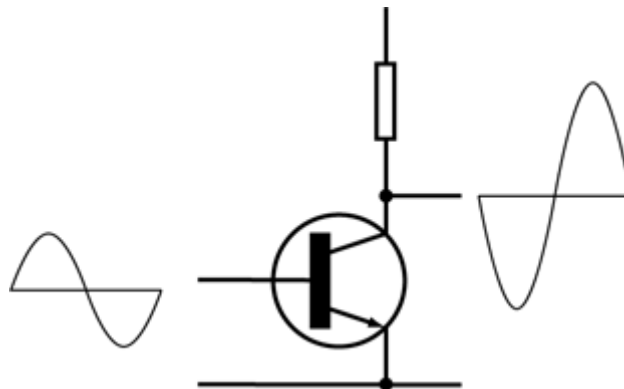
Tässä työssä tutustutaan aluksi A-, B- ja AB-luokan vahvistimiin, D-luokan vahvistimeen ja luodaan katsaus tässä työssä käytettävään subwooferiin ja sen kotelointiin. Lisäksi suunnitellaan piirilevy ja vahvistimen asennus kaiutinkoteloon ja mitataan valmista vahvistinta ja subwooferia laboratoriossa.

## 2 VAHVISTIMISTA

Vahvistimessa pienitehoista signaalia vahvistetaan käyttäen hyödyksi laitteen teholähteen energiaa. Vahvistinten pääteasteet on jaettu eri luokkiin niiden toimintamallien mukaan. Nykyään vahvistavana komponenttina käytetään useimmiten transistoria sen pienen ja edullisuuden takia, mutta joissakin sovelluksissa käytetään edelleen elektroniputkia. Elektroniputkia voidaan käyttää esimerkiksi A-luokan vahvistimessa transistorin tilalla. [1]

### 2.1 A-luokka

A-luokan vahvistin voidaan toteuttaa yhdellä transistorilla. Kuvassa 1 on kuvattu A-luokan vahvistimen malli yksinkertaisimmillaan.



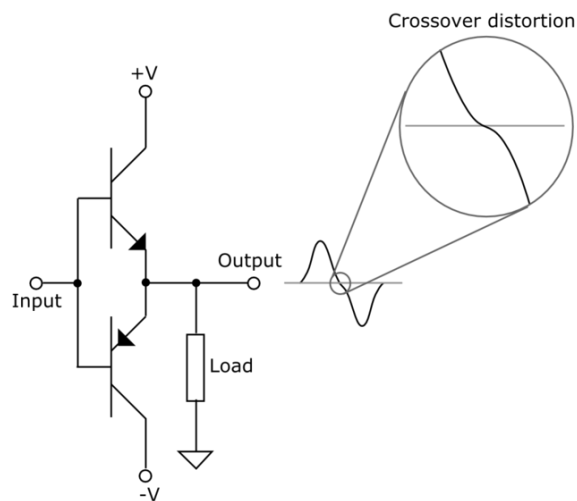
Kuva 1. A-luokan vahvistin. [1]

A-luokan vahvistimessa lähtöasteen transistorit ovat päällä koko ajan. Vaikka sisääntulosignaalia ei olisi lainkaan, kulkee pääteasteessa silti vähintäänkin kuorman vaatiman verran virtaa. A-luokan vahvistin on yksinkertainen, mutta hyötysuhde on matala, tavallisesti alle 35 %. Teholähteeltä saatava teho kuluu siis suurimmaksi osaksi muualla kuin kuormassa. Suuresta virrankulutuksesta seurausta ovat suuret lämpöhäviöt ja tarvittavat jäähdytys-elementit. Hyvinä puolina voitaisiin pitää yksinkertaisuutta ja vähäisiä säröjä. [2]



## 2.2 B-luokka

B-luokan vahvistimessa vahvistava komponentti on pois päältä puolet ajasta, jolloin se ei kuluta tehoa. Hyötysuhde on korkeampi kuin A-luokassa, mutta säröä on enemmän. Käytännössä B-asteen lähtöasteessa on sekä npn- että pnp-transistori, joista toinen johtaa positiivisella ja toinen negatiivisella signaalin puolijaksolla. Kuvassa 2 nähdään B-luokan vahvistimen ylimesosärö. Ylimesosärö tarkoittaa aluetta ulostulon signaalissa, missä transistorien kantajännitteet eivät ole riittäviä kytkeäkseen päälle transistoreita ja lähtöjännite pysyttelee lähellä nollaa. Mitä pienempi sisääntulosignaali, sitä ilmeisempi särö on. [2]



Kuva 2. B-luokan vahvistimen ylimesosärö. [3]

Ylimesosäröä voidaan pienentää tai hävittää kokonaan asettamalla transistorien toimintapisteet niin, etteivät ne sulkeudu missään vaiheessa kokonaan. Kun näin tehdään, vahvistinta kutsutaan AB-luokan vahvistimeksi. [2]

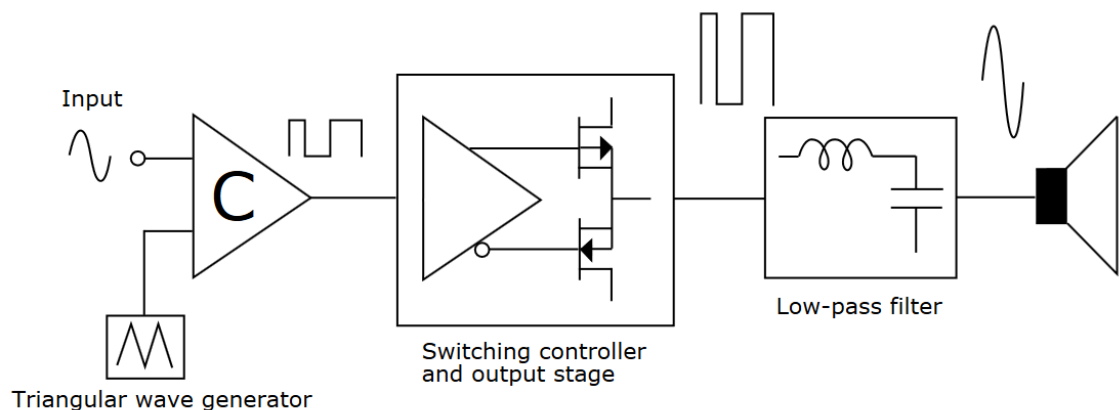
## 2.3 AB-luokka

AB-luokan vahvistimessa yhdistetään A- ja B-luokkien hyvät puolet. Suositussa vahvistinluokassa toiminta on kuten B-luokassa, eli transistoreista kummatkin ovat hieman alle puolet ajasta pois päältä. Ylimesosärö pyritään eliminoimaan asettamalla pieni lepovirta, jotta päästäisiin A-luokan kaltaiseen toimintaan. Hyötysuhde ei ole korkeam-

pi kuin 78,5 %. Tarvitaan siis edelleen jäähdytyslementtejä. Viritinvahvistimista suurimmassa osassa on perinteisesti ollut AB-luokan päätevahvistin. [2]

## 2.4 D-luokka

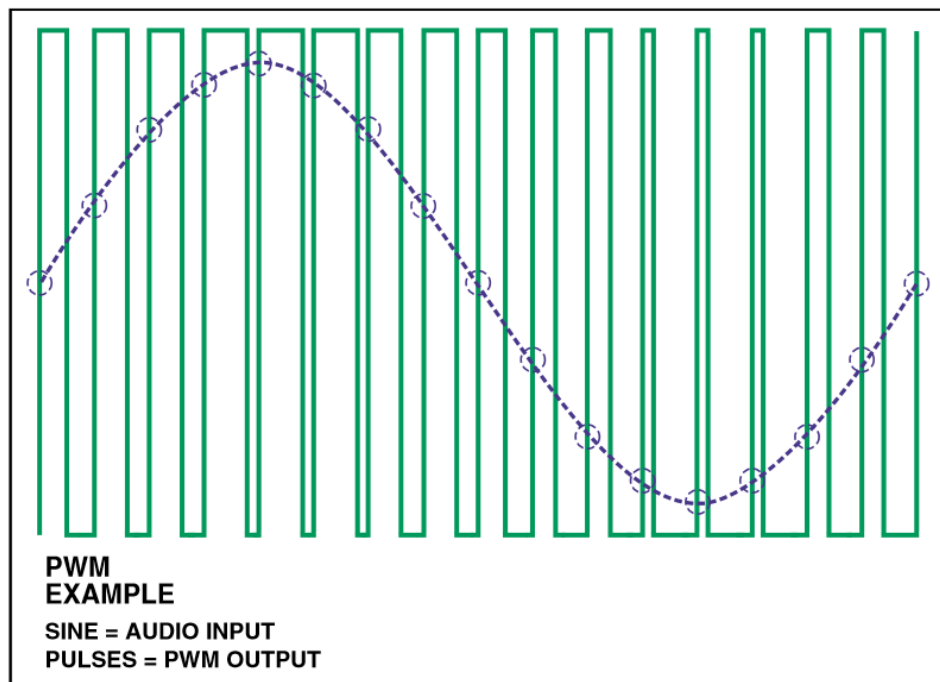
Kuvassa 3 nähdään vahvistimen lohkokaavio. D-luokan vahvistimen suurin etu on tehokkuus. Hyötysuhde on korkea kytkennän erilaisen toimintatavan vuoksi. Pääteasteen MOSFET-transistorit vaihtavat tilaa joko päälle tai pois, eli toimivat kytkiminä. Ne eivät toimi lineaarisesti, eli ulos otettava signaali ei ole suoraan alkuperäinen signaali vahvistettuna, vaan transistorit kytkevät käyttöjännitettä kaiuttimelle. Audiosignaali, joka vahvistimelle tulee, ei kuitenkaan ole tällaista sakara-aaltoa, joten signaalia pitää moduloida. Kun MOSFET-transistorit ovat kiinni, virtaa ei kulje lainkaan. Kun ne johtavat, on jännitehäviö kanavan yli matala, ja koska teho on jännitteen ja virran tulo, pysyy transistoreissa kulutettu teho matalana. [2]



Kuva 3. D-luokan vahvistimen lohkokaavio. [1]

Yleisin modulaatiokeino on PWM eli pulssinleveysmodulaatio. Sisääntulevaa signaalia verrataan komparaattorilla kolmioaaltoon eli kanta-aaltoon, jolla on tietty taajuus. Kun sisääntulosignaali on amplitudiltaan suurempi kuin vertailtava kolmioaalto, on ulostulo high-tilassa. Äänisignaalin ollessa pienempi kuin vertailusignaali ulostulo on low-tilassa. Syntyy pulsseja kanta-aallon taajuudella. PWM:n pulssisuhde on suhteessa audiosignaalin amplitudiin. Positiivisessa maksimissa pulssisuhde on lähellä 100 %:a, eli enimmäkseen ulostulosignaali on ylhäällä, 0:ssa pulssisuhde on 50 % ja negatiivisessa huipussa lähellä 0 %:a, eli enimmäkseen signaali on alhaalla. Kanta-aallon taajuuden

täytyy olla tarpeeksi suuri, jotta äänisignaalin näytteistys on riittävän tarkkaa. Kuvassa 4 nähdään havainnekuva PWM-signaalista.[2]

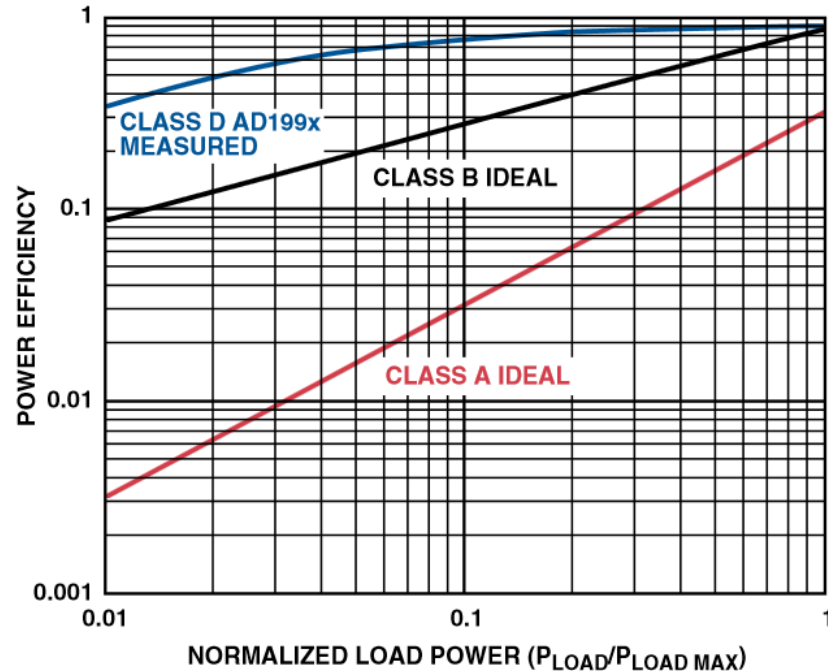


Kuva 4. PWM-esimerkki. [2]

PWM-modulaation etuna voitaneen pitää alhaisia tehohäviöitä, joita syntyy lähtöasteessa. Tehoa kuluu lähinnä transistorien kanavaresistanssien ja hilakapasitanssien takia. Suhteellisen alhaisen kantoaallon taajuuden vuoksi MOSFETin hilakapasitanssin aiheuttamat tehohäviöt pysyvät pienenä, sillä teho noudattaa yhtälöä  $CV^2f$ . Kanavaresistanssi on tyypillisesti hyvin pieni, alle  $0,5 \Omega$ , eli jännitehäviö on pieni. Suurin osa tehosta kuluu siis pääteasteen sijaan kuormassa. [2]

PWM ei ole ongelmaton ratkaisu. Moduloitu signaali sisältää alkuperäisen audiosignaalin, mutta myös signaalin perustaajuuden kerrannaisia. Korkeataajuiset komponentit pitää suodattaa pois ennen signaalin viemistä kaiuttimelle. Useimmiten suodatus tehdään  $LC$ -alipäästösuodattimella, sillä keloissa ja kondensaattoreissa energia säilyy, kunnes sitä tarvitaan, eikä mene hukkaan. Lähellä täyttä modulaatiota, eli kun pulssisuhde on hyvin korkea tai matala pulssien leveys on pieni ja muutokset voivat olla liian nopeita päätransistoreille. Näistä asioista lähinnä ulostulon alipäästösuodattimeen pitää tässä työssä kiinnittää huomiota. [2]

Äänisignaalia voidaan moduloida myös PDM-modulaatiolla, jossa pulssien määrä vaihtelee äänisignaalin amplitudin mukaan. [2] Tässä opinnäytetyössä PDM-modulaatiota ei käsitellä enempää, koska työn ohjainpiiri käyttää PWM-modulaatiota.

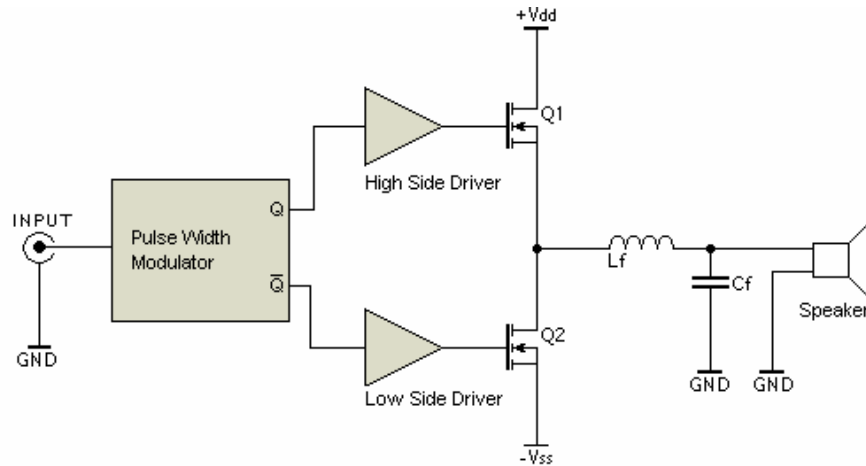


Kuva 5. Vahvistinluokkien hyötysuhteet. [2]

Kuvassa 5 nähdään D-luokan vahvistimen tehokkuus verrattuna A- ja B-luokan vahvistimiin. Kaikilla tehokkuus laskee pienemmällä teholla, jolloin myös D-luokan vahvistin erottuu suurimmalla erolla edukseen. 10 % tehon kohdalta katsottuna D-luokan hyötysuhde on 78 %, B-luokalla 28 % ja A-luokalla 3 %. Lähestyttäessä maksimitehoa kaikkien hyötysuhde nousee, ja B-luokan vahvistin näyttää saavuttavan jopa saman tason kuin D-luokan vahvistin, mille ei ollut lähdeaineistossa selitystä. B-luokan hyötysuhdehan on korkeimmillaan 78,5 %. Huomattakoon myös, että tässä kuvassa A- ja B-luokan tasot ovat ideaalitapauksessa, ja D-luokan vahvistin on käytännössä mitattu. [2]

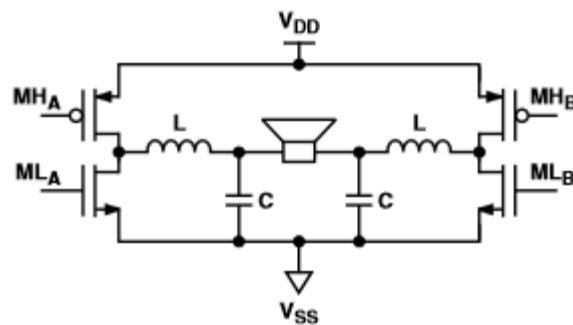
#### 2.4.1 Siltakytkennät

D-luokan vahvistimissa käytetään kahta eri topologiaa lähtöasteessa, puolisoltaa tai kokosiltaa. Kokosillassa on yhdistettynä kaksi puolisoltaa. Kuvassa 6 nähdään puolisolta LC-alipäästösuodattiminen. [2]



Kuva 6. Puolisiltakytkentä. [4]

Puolisillassa transistorit ovat päällä vuorotellen, ja virran suunta alipäästösuodattimen kelassa vaihtelee. Kelan virrat saattavat nostaa jännitelähteen jännitettä, mikä ei ole toivottavaa. Jännitteenvaihtelua voidaan rauhoittaa kytkemällä suuri kapasitanssi käyttöjännitteiden väliin. Puolisiltaa voidaan käyttää sekä yksi- että kaksipuolisilla jännitelähteillä, mutta mieluiten kaksipuolisilla. Yksipuolinen käyttöjännite saattaa aiheuttaa dc-jännitettä kaiuttimelle, joka voidaan tuki estää kondensaattorilla. Kuvan 7 kytkennässä nähdään pääteasteen kokosiltakytkentä. [2]



Kuva 7. Kokosiltakytkentä. [2]

Kuten puolisillassa, ylä- ja alatransistorit ovat vuorotellen päällä, mutta vastakkaisilla puolilla kaiutin-alipäästösuodatinkytkentää. Virta kulkee siis toisen puolen ylätransistorin läpi ja toisen alatransistorin läpi. Näin vältetään puolisillan kelan virtaongelma, sillä virta pääsee kulkemaan toisen puolisillan kautta maahan. Kokosillassa käytetään tyypillisesti yksipuolista käyttöjännitettä. [2]

Kokosillalla kuormaan saadaan amplitudiltaan kaksinkertainen signaali ja nelinkertainen teho verrattuna puolisillan. Toiselle puolelle kuormaa syötetään sisääntulosignaalin negatiivinen puolijakso, kun toisella puolella on positiivinen puolijakso. Näin saadaan kaksinkertainen amplitudi aallonhuippujen välille verrattuna siihen, että kaiuttimen toinen napa olisi maassa. [2]

#### 2.4.2 Särö

Yksi vahvistimien tärkeimmistä ominaisuuksista on kokonaisharmonisen särön määrä (*THD*). D-luokan vahvistimessa on muutamia tapauksia, jotka aiheuttavat säröä. Särö tarkoittaa epäidealisoituksia, jotka aiheuttavat taajuusspektriin energiaa eri taajuuksille. [7]

Jos vahvistimen päätetransistorit olisivat päällä yhtä aikaa, syntyisi matalaresistanssinen tie virralle suoraan maahan tai negatiiviseen käyttöjännitteeseen. Tämän ongelman välttämiseksi transistorien toiminta pitäisi olla ajastettu niin, että pulssien välissä on pieni aika, jolloin ei tapahdu mitään. Tästä odotusajasta syntyy säröä. Särön määrä on suoraan verrannollinen odotettavaan aikaan, eli paras tapa välttää säröä on odottaa pienin mahdollisin aika. [2]

Muita särön lähteitä ovat muun muassa *LC*-alipäästösuodattimen komponenttien epälineaarisuudet, lähtöasteen erilaiset ajastusvirheet ja teholähteeltä kulkeutuva kohina. Tätä kohinaa voidaan vaimentaa esimerkiksi takaisinkytkennällä, jolloin *PSRR* kasvaa. *PSRR* eli power supply rejecton ratio kuvaa kytkennän kykyä estää käyttöjännitteen vaihtelun vaikutus ulostulojännitteeseen. Vahvistinkäyttöön tarkoitetut IC:t ovat usein suunniteltu niin, että saataisiin hyvä eli korkea *PSRR*. [2]

## 3 SUBWOOFER

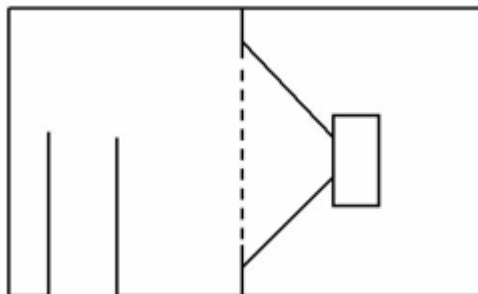
### 3.1 Kaiuttimesta

Monet kovaääniset toistavat vain korkeampia ääniä. Bassokaiutin eli subwoofer on kaiutin joka on koteloltaan ja kaiutinelementiltään rakennettu varta vasten täydentämään äänentoistojärjestelmien taajuusaluetta toistamalla matalia ääniä. [5]

Kaiutinkoteloita on erilaisia: avoin kotelo, suljettu kotelo, refleksikotelo ja kaistanpäästökotelo. Suljetussa kotelossa kaiutinelementin takana on ilmaa, joka toimii jousena palauttaen kartion lepoasentoon, kun signaalia ei ole. Refleksikotelo on suljettu kotelo, jossa on reikä. Kaiutin pyritään virittämään niin, että se on mahdollisimman herkkä. Äänenvoimakkuutta voidaan kasvattaa laittamalla koteloon kuitumateriaalia, esimerkiksi villaa. Kaistanpäästökotelo on suljetun ja refleksikotelon yhdistelmä. Nimensä mukaisesti kotelo on kaistanpäästösuodatin. Kotelo viritetään jollekin tietylle taajuusalueelle. Tarkoituksena on saada hyvä bassotoisto pienellä kotelolla. [5]

### 3.2 Työssä käytettävä kaiutin

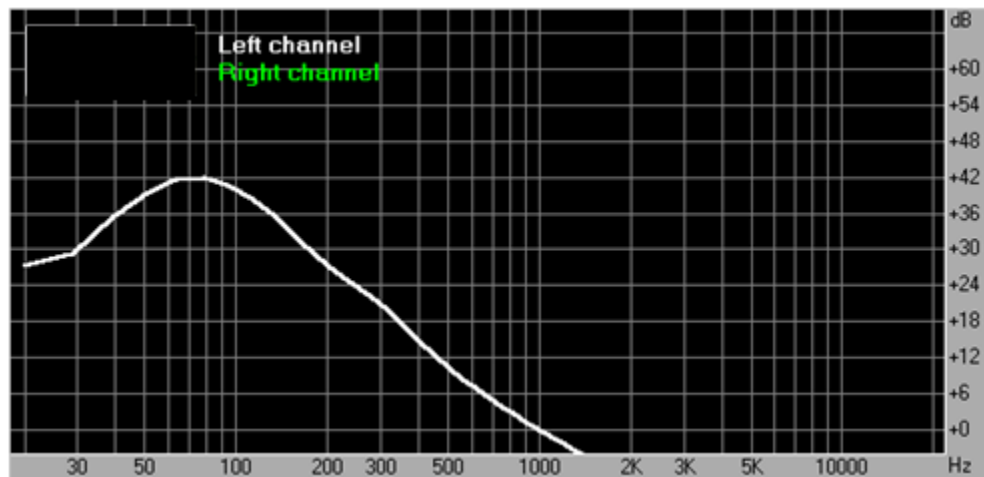
Kuvassa 8 on 4. asteen kaistanpäästökotelon kuva. 4. asteen kotelossa vain toisessa kammiossa on putki. 6. asteen kotelossa kummassakin olisi putki. Ylempänä on suljettu kotelo ja alempana refleksikotelo. Työssä käytetty kaiutin oli tämänkaltainen. Kotelo kaiutinelementin takana oli täytetty villalla, ja refleksiputken ja kotelon välissä oli myös täytettä.



Kuva 8. 4. asteen kaistanpäästökotelo. [6]

Subwoofer oli jäänyt yli käytöstä poistetusta Cambridge Soundworksin DTT3500 5.1 - kaiutinjärjestelmästä. Kaiutinkotelon avaamisella saatiin selville kaiutinelementin teholuokitus ja impedanssi: 30 W ja 6  $\Omega$ .

Subwooferin koteloja tai ominaisuuksia ei muutettu, sillä bandpass-kotelot on usein tarkkaan suunniteltu, jotta sointi olisi toivotunlaista. Vertailukohdaksi tuleville mittauksille löytyi internethaulla erään kuluttajaelektroniikan arviointisivun tekemä amplitudivas-temittaus juuri tälle subwooferille, joka on esillä kuvassa 9.



Kuva 9. Subwooferin amplitudivaste. [7]

Nähtäväksi jäi, saataisiinko omissa mittauksia samankaltaisia tuloksia. Amplitudivas- teesta nähdään joka tapauksessa subwooferille tarkoitettu taajuusalue: toiston tasainen alue on alueella 60–90 Hz, ja rajataajuus (–3 dB) on 100 Hz:n tienoilla.



## 4 SUUNNITTELU

### 4.1 Piirin valinta

Lähdemateriaaleja lukiessa tuli selväksi, että kannattavin tapa valmistaa D-luokan vahvistin on käyttää valmiita IC-piirejä, joita on saatavilla useilta valmistajilta. Työ aloitettiin etsimällä sopiva piiri.

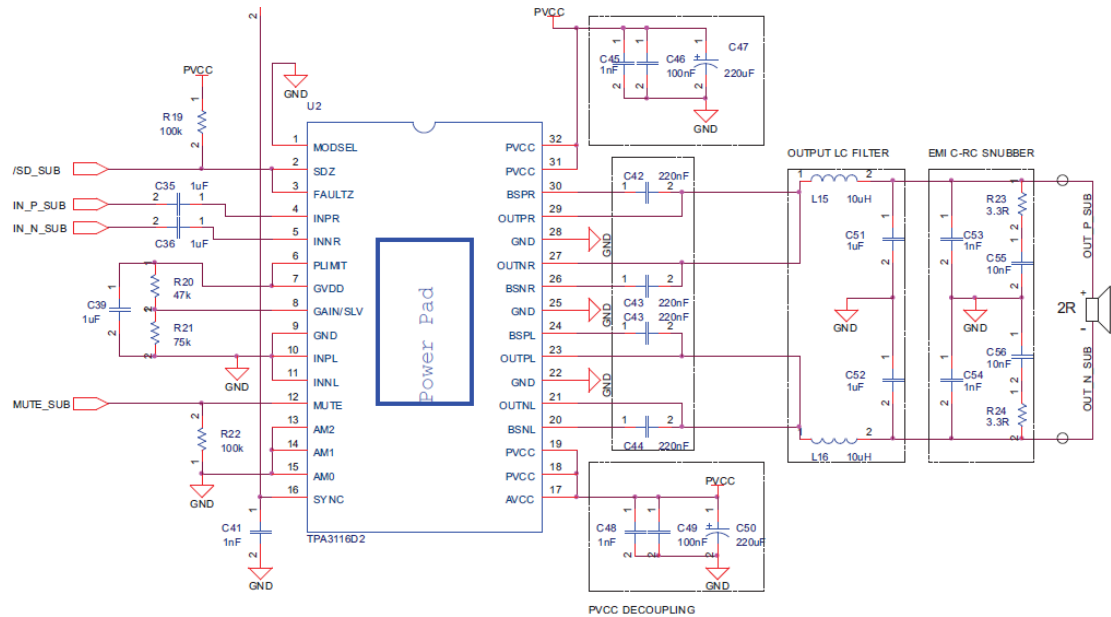
Vahvistinpiirille oli muutamia kriteerejä:

- riittävä teho 6  $\Omega$ :lle, yli 30 W
- mahdollisimman alhainen *THD*
- sisältää PWM-modulaattorin
- sopiva hinta.

Haualla löytyi useita valmistajia, mutta Texas Instrumentsilla näytti olevan kattavin valikoima eritehoisia vahvistinpiirejä. Monilla muilla piirit olivat joko liian matalatehoisia, tai vahvistintehoa oli aivan tarpeettoman paljon. Tehokkaammat vahvistimet ovat lisäksi usein ilman sisäistä PWM-modulaattoria. Texas Instrumentsilta on saatavilla myös useita ohjetiedostoja internetissä sopivan vahvistimen valintaan, vahvistimen alipäästösuodattimen suunnitteluun ja simulaatio-ohjelma piirin simulointia varten.

Texas Instrumentsin TPA3118D2 näytti täyttävän kriteerit. Tehoa luvataan  $2 \times 30 \text{ W} / 8 \Omega$ , eli  $1 \times 60 \text{ W} / 4 \Omega$ . Tehoa pitäisi 6  $\Omega$ :lle riittää ainakin 30 W. Datalehdellä *THD*:n lupailtiin monokytkennässä pysyvän alle 1 % jopa 60–80 W:iin asti. Signaalin juuri ja juuri alkaessa leikkaantua 1 kHz:n signaalilla voitaisiin katsoa *THD*:n olevan 1 %. [7]

Vahvistimen kytkentänä käytettiin datalehdellä esiteltyä vahvistimen monokytkentää, joka on esillä kuvassa 10. Datalehdellä tämä kytkentä on tarkoitettu 2.1-vahvistinkytkennän subwoofer-vahvistimeksi. Päätetransistorit muodostavat kokosilta-kytkennän käytettiin vahvistinta sitten kaksi- tai yksikanavaisena, joten yksipuolinen käyttöjännite sopii parhaiten käytettäväksi. [7]



Kuva 10. VahvistinkytKentä yhdelle kanavalle. [7]

TPA3118D2-piiristä on olemassa myös tehokkaammat ja pienitehoisemmat versiot, joilla on sama pakkaus ja pinnijärjestys, joten kytkentään voisi rakentaa tehokkaamman vahvistimen. [7]

#### 4.2 Simulaatio

Texas Instruments tarjoaa sivuillaan valmistamiinsa komponentteihin SPICE-malleja ja niitä hyödyntäviä simulaatiokytKentöjä omalle TINA-TI SPICE -ohjelmalleen tai esimerkiksi PSPICE:lle.

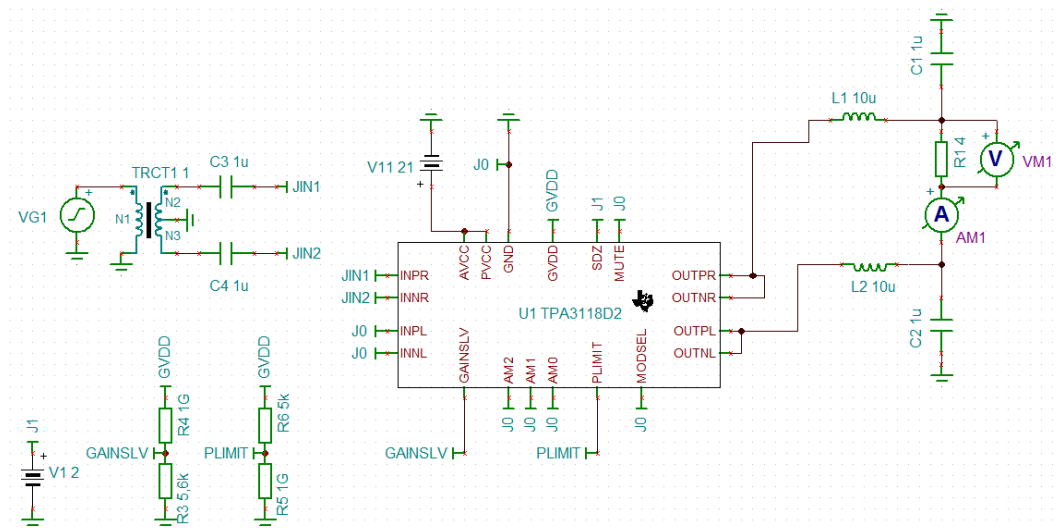
Piiristä ladattiin Reference design -malli, jolla simuloitiin kytkentää TINA-TI-ohjelmassa. Piirin tiedostossa on mallinnettu pääteasteiden PWM-modulaatio ja muita piirin toimintoja kuten *GAIN/SLV*, *PLIMIT* (power limit), *SDZ* (shutdown) *MODSEL* (modulation select) ja *MUTE* (mykistys). *SDZ*-toiminnolla voidaan asettaa erilaisia sammutustoimintoja, esimerkiksi oikosulun sattuessa. *GAIN/SLV*-pinnille määritellään kahden vastuksen jännitteenjaolla vahvistimen vahvistuskerroin ja onko vahvistin master- tai slave-tilassa, sillä piiri voidaan synkronisoida toimimaan toisen IC-piirin kanssa yhtäaikaan. Vastusarvojen muuttaminen muuttaa vahvistimen sisääntuloimpedanssia, esim. 20 dB gain ja 60 k $\Omega$  tai 36 dB ja 9 k $\Omega$ . Vahvistuskerrointa ei voi muuttaa laitteen ollessa päällä. [7]

*PLIMIT*-nastan jännitteellä voidaan asettaa ulostulon jännitteelle raja, jolla voidaan rajoittaa tehon antoa ja välttää signaalin leikkaantuminen. Toiminnolla luodaan ns. virtuaalinen käyttöjännite. Rajoitettu jännite on pienempi kuin varsinainen käyttöjännite, joten signaali ei pääse leikkaantumaan. Virtuaalinen käyttöjännite on noin 4 kertaa *PLIMIT*-nastan jännite. [7]

*MODSEL* -nastalla voidaan säätää kahden eri modulaatiotavan välillä: BD- tai 1SPW-modulaatio. BD-modulaatiolla voitaisiin ajaa induktiivista kuormaa ilman *LC*-suodatinta, jos kaiutinjohdot ovat lyhyet. 1SPW -toiminnolla normaalia modulaatiotapaa muutetaan, jotta päästäisiin korkeampaan hyötysuhteeseen pienellä *THD*:n korotuksella. 1SPW vaatii myös tarkkaa ulostulosuodattimen suunnittelua, tai se voi alkaa värähdellä. [7]

*MODSEL* oli kuvan 10 esimerkkikytkennässä ja simulaatitiedostossa maissa, eli asennossa BD, joten se päätettiin jättää ennalleen simuloidessa ja käytännön vahvistimessa. Selvää kuvaa ei ollut siitä, mikä laskettaisiin lyhyiksi kaiutinjohdoiksi ja luottamus *LC*-suodattimen suodattamaan signaaliin oli parempi, joten *LC*-suodattimetkin jätettiin paikalleen. Simulaatiokytkentä on esillä kuvassa 11.

IC:ssä on joka kanavalle myös *BS*- eli bootstrap-jalka, johon kytkettävä kondensaattori toimii kelluvana teholähteenä. Kondensaattorilla varmistetaan, että fetin hilajännite säilyy tarpeeksi korkeana ja MOSFETit toimivat oikein. [7]



Kuva 11. TPA3118D2-kytkentä TINA-TI-ohjelmassa.

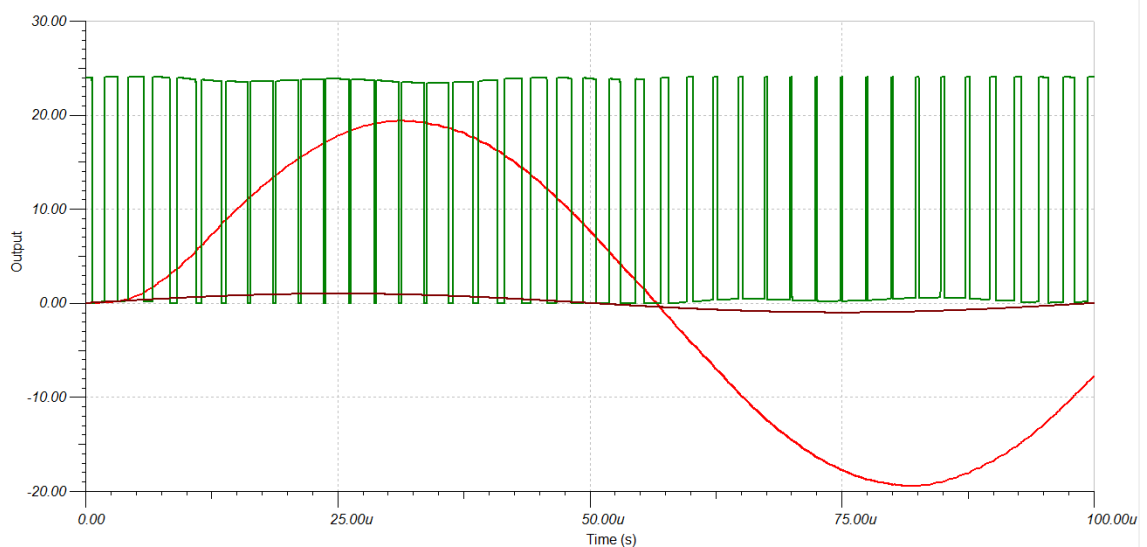
TPA3118D2:ssa on vahvistin kahdelle kanavalle. Mono-tilaan (datalehdellä PBTL, parallel bridge tied load) vahvistinpiiri asetetaan maadoittamalla pinnit *INPL* ja *INNPL* eli

vasemman kanavan sisääntulot. Tällöin signaali otetaan sisään nastoista *INPR* ja *INNER*. Ulostulon puolella kummankin kanavan positiivinen ja negatiivinen nasta kytetään yhteen. Oikea kanava kytetään yhdelle ja vasen toiselle puolen kaiutinta, jota esittää kuvassa vastus *R1*. [7]

Vahvistimessa on mahdollisuus säätää PWM-kytkentätaajuutta nastoilla *AM0*, *AM1* ja *AM2*. Nastojen eri jänniteyhdistelmällä voidaan valita taajuus väliltä 400–1 200 kHz. Vaihtavamalla kytkentätaajuutta voidaan estää haitallista AM-taajuuksien häirintää eli hallita, mille taajuudelle perustaajuus ja ensimmäinen harmoninen komponentti asettuvat. Asetuksella 0-0-0 taajuus on 400 kHz, jota päätettiin olla muuttamatta. Lähtöön voidaan asentaa lisäksi ferriitit, joilla voidaan vähentää EMI-päästöjä. [7]

#### 4.2.1 Transient-simulaatio

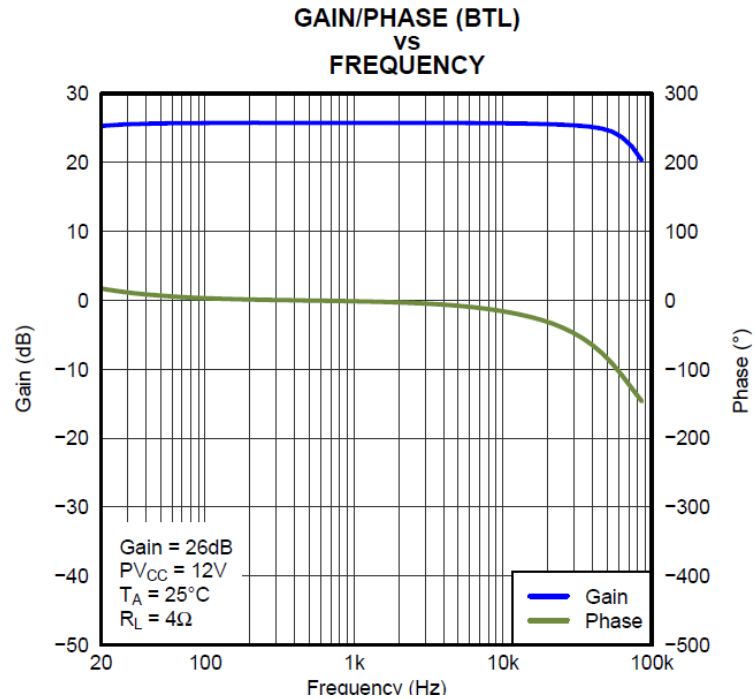
Asetettiin kuvan 11 vastukset *R3* ja *R4* yhdistelmään 20 k $\Omega$  ja 100 k $\Omega$  eli 26 dB:n vahvistus. Sisääntulon jännite asetettiin 10 kHz:n sinisignaalksi 1 V:n amplitudilla. Kuvassa 12 nähdään ennen LC-alipäästösuodatinta simulaatiossa mitattu PWM-moduloitu signaali, 20 V:n jännite vastuksen *R1* yli ja sisääntulon 1 V:n jännite. Vahvistus lähtöön on siis 26 dB.



Kuva 12. PWM-moduloitu signaali, ulostulojännite ja sisääntulojännite TINA-TI:n transient-simulaatiossa.

#### 4.2.2 Taajuusvaste

Simulaatio-ohjelmassa piirin amplitudi- ja vaihevastetta ei pystytty simuloimaan. Valmistajan mittaama taajuusvaste eräälle kytkennälle on näkyvillä kuvassa 13.



Kuva 13. Vahvistimen taajuusvaste. [7]

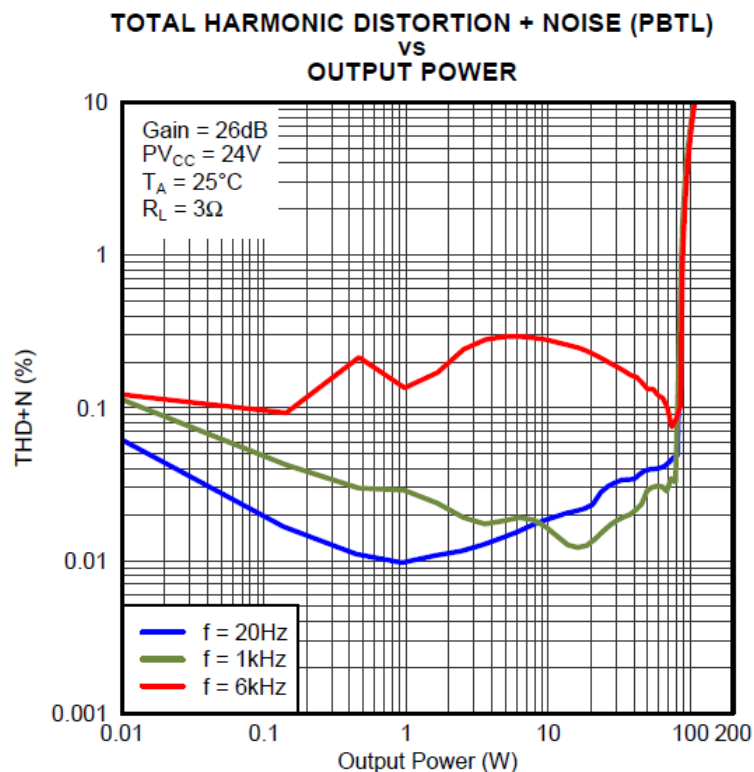
Vahvistimen amplitudi- ja taajuusvaste pysyvät pitkälti suorina kuuloalueella. 100 kHz:n kohdalla vahvistus on pudonnut noin 5 dB. Käytännössä ulostulon LC-alipäästösuodattimen komponentit määrittävät rajataajuuden. Alipäästösuodattimen rajataajuuden kaavalla

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

rajataajuudeksi muodostuu noin 50 kHz, kun  $L = 10 \mu\text{H}$  ja  $C = 1 \mu\text{F}$ . Kuvassa 13 rajataajuus näyttäisi myös olevan 50 kHz:ssä.

#### 4.2.3 THD

Verrattiin aluksi datalehden muutamiin *THD*-arvoihin vastaavaan kytkentään simulaatiossa. Datalehdellä kuviossa vahvistimelle on mitattu 26 dB:n gain-arvolla 24 V:n käyttöjännitteellä 3  $\Omega$ :iin, 10 W:n teholla ja 1 kHz:n taajuuisella signaalilla 0,02 % *THD+N*. Samoilla asetuksilla simulaatiossa tehtiin ulostulon transientin kahdelta jaksolta Fourier-muunnos ja *THD*:n suuruudeksi saatiin 0,17 %. Arvo ei ole niin pieni kuin datalehdellä annettu, mutta pysyttelee suunnilleen samana aina miltei signaalin leikkaantumiseen asti. Simulaattori ei liene kovin tarkka apuväline *THD*:n määrittämiseen kytkennästä, mutta 0,17 %:nkin arvo on aivan riittävä, äänestä kuulumaton särön määrä. Toisin kuin simulaatiossa, käytännössä kaiuttimet eivät kuitenkaan ole täysin resistiivisiä eikä impedanssi ole vakio eri taajuuksilla, mikä saattoi myös vaikuttaa simulaation tuloksiin. Kuvassa 14 on valmistajan mittaamat *THD+N* eräälle PBTL-kytkennälle. Valmistajan kaavioissa on mitattu *THD*:n lisäksi myös kohina, mutta silti arvot olivat lupavia.



Kuva 14. Valmistajan mittaama *THD+N*. [7]

### 4.3 Toimintojen määrittely

Käyttöjännitteeksi päätettiin vahvistimelle 24 V. Suuremmalla käyttöjännitteellä saadaan enemmän tehoa ja pienempi *THD*, kun teho pysyttelee kauempana maksimista.

*PLIMIT*-jännite asetettaisiin jännitteeseen *GVDD*, jolla ulostulon jännite rajoittuu käyttöjännitteeseen. Kodin viritinvahvistinta mitattiin laboratoriossa, jotta päästäisiin selvyyteen subwooferin vahvistimelle tulevan signaalin tasosta. Jakosuodinta ei tarvittaisi, sillä kotivahvistimella voi säätää subwooferille jaettavan taajuuden, ja alarajataajuus oli 11 Hz. Jännite viritinvahvistimen sub pre out -liitimestä musiikin kuuntelussa oli normaalikuuntelun ja kovaäänisenkin kuuntelun äänenvoimakkuudella enimmillään 2 V:n luokkaa. 26 dB:n vahvistuksella signaali alkaisi perinteisesti leikkaantua jo 1,2 V:n jännitteellä, mutta *PLIMIT*-toiminnon pitäisi rajoittaa ulostulo käyttöjännitteen maksimiin. Äänenvoimakkuutta kasvatettaessa kohti maksimia sub pre out -liitännän jännitteen amplitudi nousi jopa 15 V:iin.

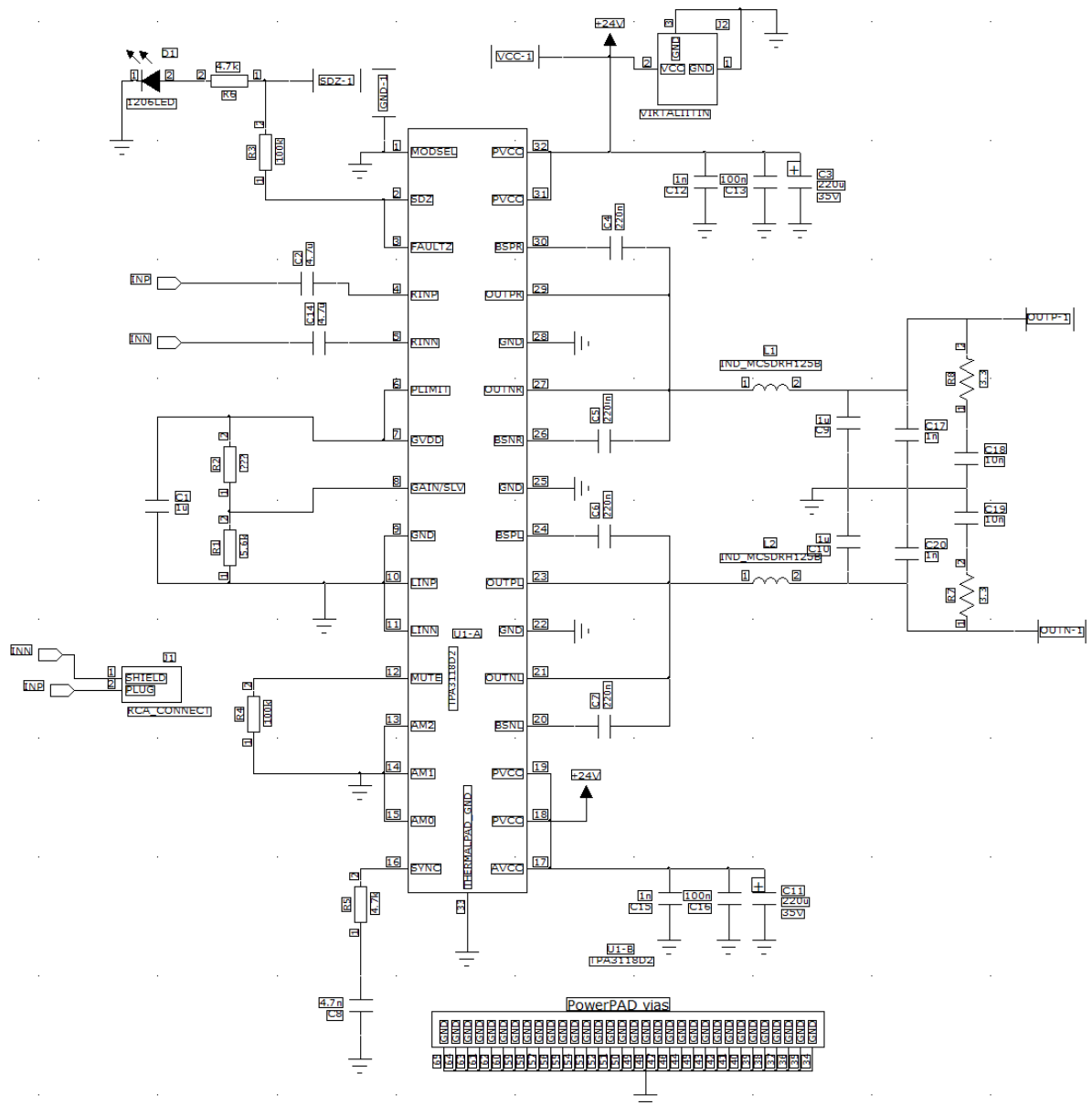
Vahvistimen muita toimintoja ajateltiin käytettävän seuraavasti:

- shutdown-toimintoon kytkin
- mute-toimintoa ei käytettäisi
- *AM*-nastat järjestykseen 0-0-0 (400 kHz:n toimintataajuus)
- *FAULTZ*-toimintoa (oikosulku-, DC ja lämpötilasuojatoiminto) käytettäisiin
- lähtöön tulisi *LC*-alipäästösuodatin.

Joissain tapauksissa piiri voisi ajaa kaiutinta ilman *LC*-suodatintakin, mutta suodattimen kanssa saavutetaan parempi tehokkuus, ja suodatetaan korkeataajuisia signaalin osia pois. [7]

### 4.4 Piirikaavion laatiminen ja layoutin suunnittelu

Kuvassa 15 on vahvistimen PADS Logic -piirikaavio. KytKentä on sama kuin kuvan 10 datalehdeltä otettu kytKentä, lukuun ottamatta itse lisättyä lediä, *RCA*-liitintä ja virtaliitintä. Shutdown-toimintoa ajateltiin ohjailtavan kytkimellä. IC:n piirtäminen piti tehdä tietyllä tapaa, jotta IC:n alle tulevat läpiviennit saatiin näkymään oikein. Läpiviennille tehtiin oma komponenttinsa, jossa oli 32 kytKentää maahan.



Kuva 15. Piirikaavio.

Layoutin suunnittelussa hyödynnettiin valmistajan datalehdellä esittelemää kytkentää (kuva 10). Korkean toimintataajuuden takia piirilevyn suunnitteluun piti kiinnittää huomiota. Valmistajan ohjeiden mukaan vedot pidettiin mahdollisimman lyhyinä. Korkeataajuisien signaalien ja pitkien vetojen kanssa rakennetaan helposti turhaan säitelevä antenni. Kannustimena kompaktiin kokoon oli myös piirilevyvalmistajan halvempi hinta erälle pienillä levyillä. Eri komponentteja valittaessa noudatettiin datalehden ohjeita.

Layoutin suunnittelu toteutettiin PADS Logic-, PADS Layout- ja PADS Router-ohjelmilla. Aivan aluksi etsittiin sopivat osat tukkumyyjän internetsiviltä. Osat valittiin



lähinnä saatavuuden ja hinnan perusteella kiinnittäen toki huomiota myös kunkin komponentin keskeiseen ominaisuuteen. Ohjelmaan laadittiin osien datalehtien piirrustusten perusteella sopivankokoiset kuvakkeet sekä logiikka- että layoutpuolelle. Samalla tehtiin listaa aikanaan tilattavista komponenteista. Tuli olla varma esimerkiksi kondensaattorien riittävästä jännikestosta ja kelojen virrankestosta. Vastusten kooksi valittiin 0805, kondensaattorien 1206 ja muutamilla yksittäisillä komponenteilla oli omat kokonsa. Pyrittiin käyttämään mahdollisuuksien mukaan SMD-komponentteja, mutta vahvistimelle tuleva RCA-liitin ja virtaliitin olivat läpiladottavia. Lisäksi kaiuttimelle menevät johdot ja virtakatkaisijan johdot tulivat levyn läpi.

TPA3118D2 on rakennettu niin, että ulostuloon liittyvät jalat ovat piirin oikealla ja sisään-tulon liittyvät jalat piirin vasemalla puolella (yläpuolelta katsottaessa), mikä helpotti piirtämistä. KytKentä oli myös helppo tarkastaa, koska layoutissa olevat IC:n nastat olivat samalla paikalla kuin piirikaaviossa. Piirilevy suunniteltiin kaksipuoliseksi. Alapuo- li oli pääasiassa maataso, jonka läpi vedettiin myös käyttöjänniteveto. Vahvistinpiirin alapinnassa on lämpölevy, jolle piirrettiin kuparialue ja alueelle 32 läpivientä, joilla le- vyn ala- ja yläpuoli yhdistettiin samaan maatasoon. Yläpuolen tyhjät alueet täytettiin myös maakuparilla. Vahvistimessa syntyvä lämpö johtuu maakupariin ja säteilee il- maan sitä kautta.

Layout pyrittiin pitämään mahdollisimman selkeänä ja kompaktina, mutta komponentte- ja ei ehdettu liian taajaan. Yksi tärkeä seikka oli varmistaa käyttöjännitteelle ja kaiutti- melle vievien vetojen riittävä leveys. Vedolle riittävä leveys laskettiin internetissä siihen tarkoitettulla laskurilla. 24 V:n käyttöjännitteellä virran arvioitiin suurimmillaan 6 Ω:n kuormaan olevan 3 A. Tämä saatiin kaavasta

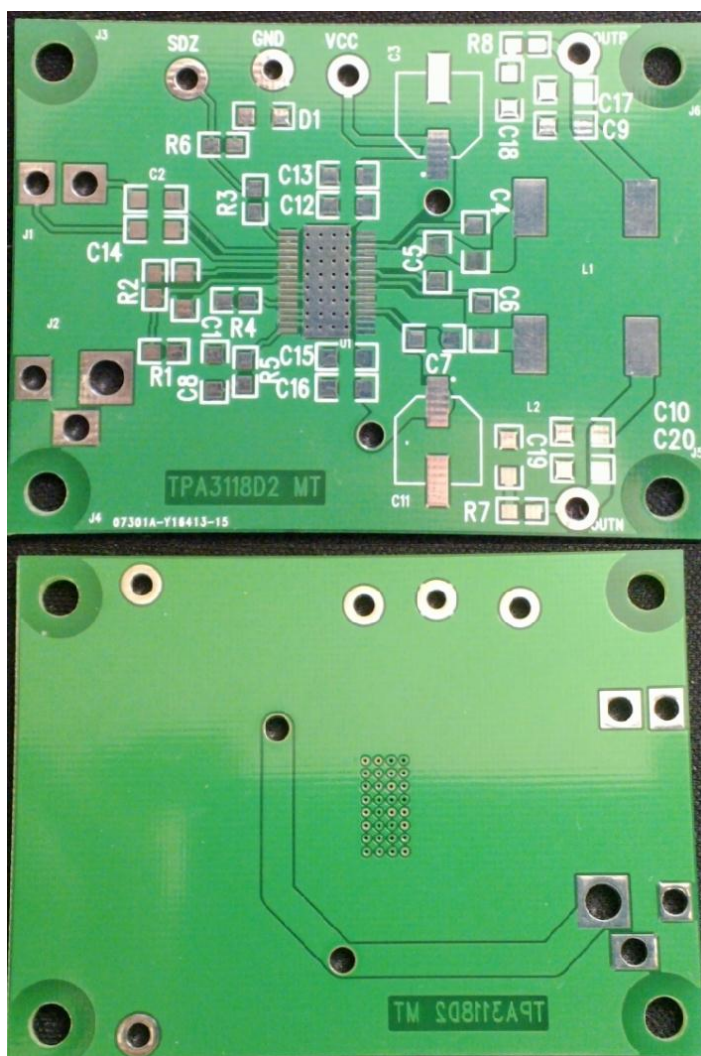
$$P_{avg} = \frac{U^2}{2R},$$

missä  $U$  on käyttöjännite ja  $R$  kuorman resistanssi. Laskurin mukaan 1,5 mm:n leveys olisi riittävä, joten tärkeimmät vedot tehtiin vähintään 2 mm leveiksi.

LC-suodattimen lisäksi lähtöön sijoitettiin datalehden tapaan kondensaattoreista ja vas- tuksista koostuva kytKentä, jonka tarkoitus on hillitä EMI-päästöjä korkeilla, megahert- sien taajuuksilla.

#### 4.5 Piirilevyn valmistus ja kokoaminen

Alusta pitäen piirilevy oli tarkoitus tilata piirilevyjä valmistavalta yritykseltä. Layoutin valmistuttua levyjä tilattiin eräältä hongkongilaiselta valmistajalta kymmenen kappaletta, joiden saapumisessa kesti kymmenisen päivää. Tilatessa tulivat tutuiksi ne edellytykset, joita piirilevyn valmistajalla on asiakkaan tilauksen valmistamista varten. Valmistajalle piti lähettää erillisinä tiedostoina levyn kummankin puolen kupari-, juotosmaski- ja silkkikerrokset, porapiirros ja levyn ulkoreunat. Valmistajalta saatu piirilevy on kuvassa 16.

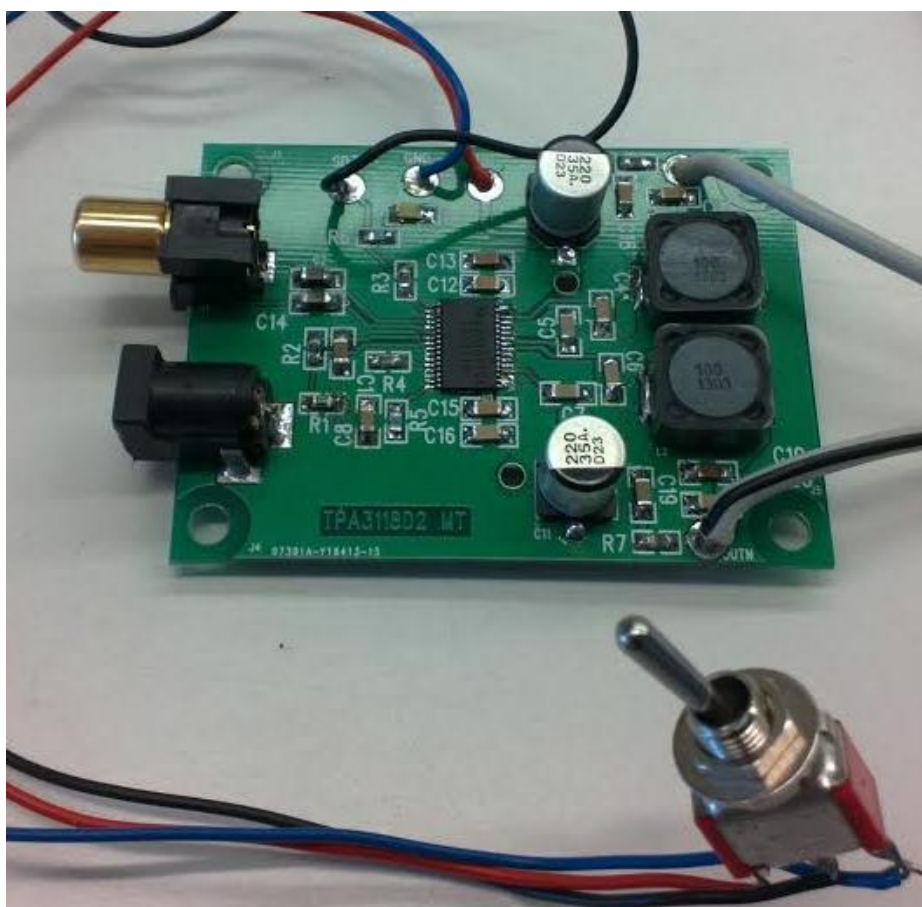


Kuva 16. Piirilevyn molemmat puolet.

Levyjen saavuttua varmistettiin tilattujen komponenttien sopivuus niille tarkoitetuille paikoille ja juotettiin ensimmäiseksi kahdelle levyille yhtäkaa kaikki komponentit, jotta

jonkin virheen sattuessa toinen piirilevy olisi jo valmiina. Ensimmäisen levyn IC:n jalkojen kohdalta alumiini paloi irti tinaimuria käytettäessä, kun vahvistin-IC:tä ei ollut vielä juotettu kiinni. Toiseen levyyn saatiin rakennettua koko kytkentä, mutta toiseen sisään-tuloon muodostui maahan oikosulku, jota ei saatu paikallistettua, mutta oli luultavasti syntynyt IC:n alle. Toinen mahdollisuus on, että IC vaurioitui testeissä.

Kolmannen levyn kanssa juotustyö tehtiin entistäkin huolellisemmin, ja koko kytkentä saatiin onnistuneesti rakennettua. Kuvassa 17 on esillä lopullinen versio. Ainoa muutos alkuperäiseen piirikaavioon oli RCA-liittimen negatiivisen sisääntulon ac-maadoitus, jotta vahvistin saatiin toimimaan oikein.



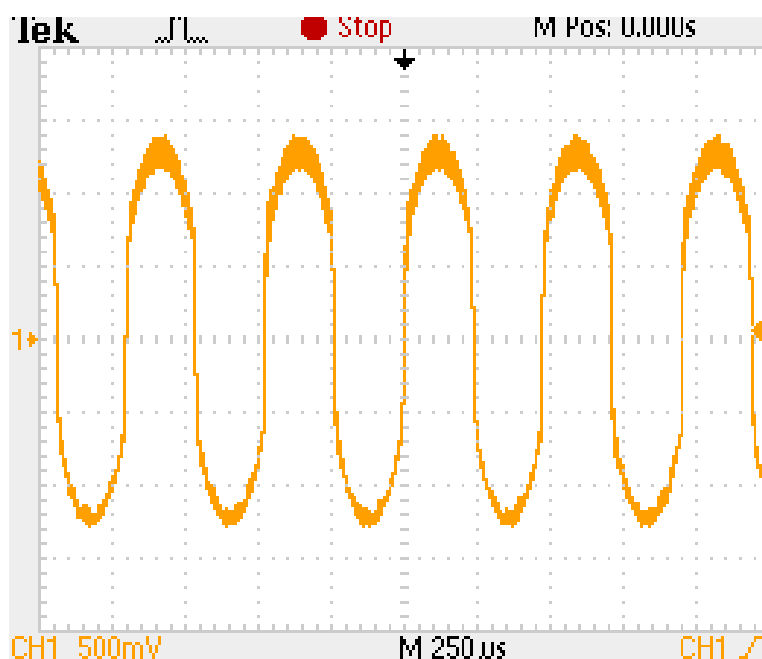
Kuva 17. Valmis piirilevy.

Piirilevyn kulmiin tehtiin reiät kiinnitysruuveille, joilla levy saataisiin kiinni kaiuttimen muovikanteen. Liittimet oli sijoiteltu niin, että ne saataisiin lähekkäin kotelon reunaan. Kytkin (On-On) juotettiin johtojen päihin, jolloin sen sijoittelu olisi vapaampaa. Kytkimellä shutdown ajetaan käyttöjännitteeseen tai maahan. SMD-led toimii tilan ilmaisimena.

## 5 MITTAUKSET

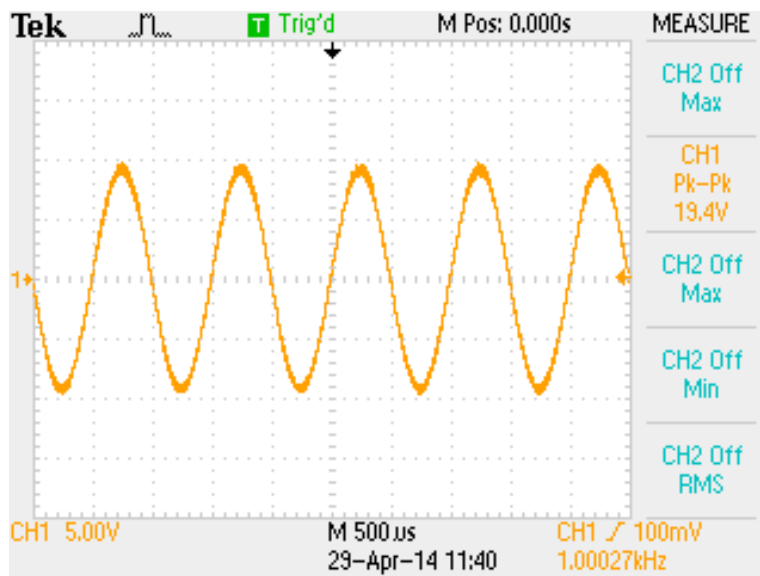
### 5.1 Transient

IC:n jokainen jalka tarkastettiin oikosulun varalta ennen mittausten aloittamista. Ulostuloon kaiuttimen tilalle kytkettiin synteettinen kuorma, ja mitattiin ulostuloa. Vahvistimeen syötettiin eritaajuisia sinisignaaleja, mutta ulostulon aaltomuoto oli säröytyneen näköinen, eikä vahvistus ollut likikään 26 dB. Kuvassa 18 on vahvistimen lähtöjen väliltä mitattu signaali. Sisääntulosignaalin huipusta huippuun jännite oli 1 V, eli ulostulon jännite oli vain suunnilleen kolme kertaa alkuperäistä suurempi (9,5 dB).



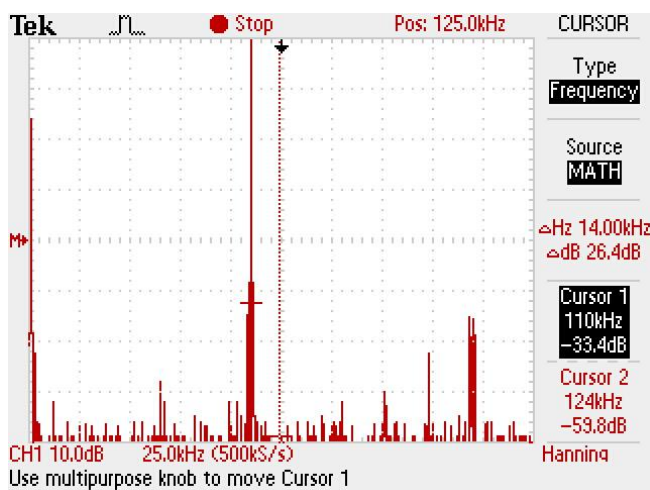
Kuva 18. Ensimmäinen transient-mittaustulos.

Kuuntelutestissä kuultiin hyvin pienillä signaaleilla melko puhdasta ääntä, mutta nopeasti signaali alkoi säröytyä sisääntulojännitteen kasvaessa. IC-piiriä toiselta puolen painettaessa ulostulon aaltomuoto muuttui puhtaammaksi siniksi, ja amplitudi kasvoi odotettuihin lukemiin. IC:n sisääntulopuolen jalkojen juotokset tarkastettiin uudelleen, muutamia juotoksia ehostettiin ja vahvistimen toiminta korjaantui. Kuvassa 19 on seuraava mittaustulos.



Kuva 19. Toinen transient-mittaustulos.

Sisään syötettiin sinisignaalia, jonka jännite huipusta huippuun oli 1 V 1 kHz:n taajuudella. Kuvasta 17 nähdään, että vahvistus oli 19,4-kertainen, 25,75 dB, eli hyvin lähellä toivottua 26 dB:iä. Aaltomuoto myös näyttää enemmän siniaallolta. Kuuntelutestissä signaali kuului puhtaalta, eikä musiikkitestissäkään havaittu äänien säröytymistä suuremmillakaan amplitudeilla. Kuvassa 20 on oskilloskoopilla tarkasteltuna signaalin spektri.



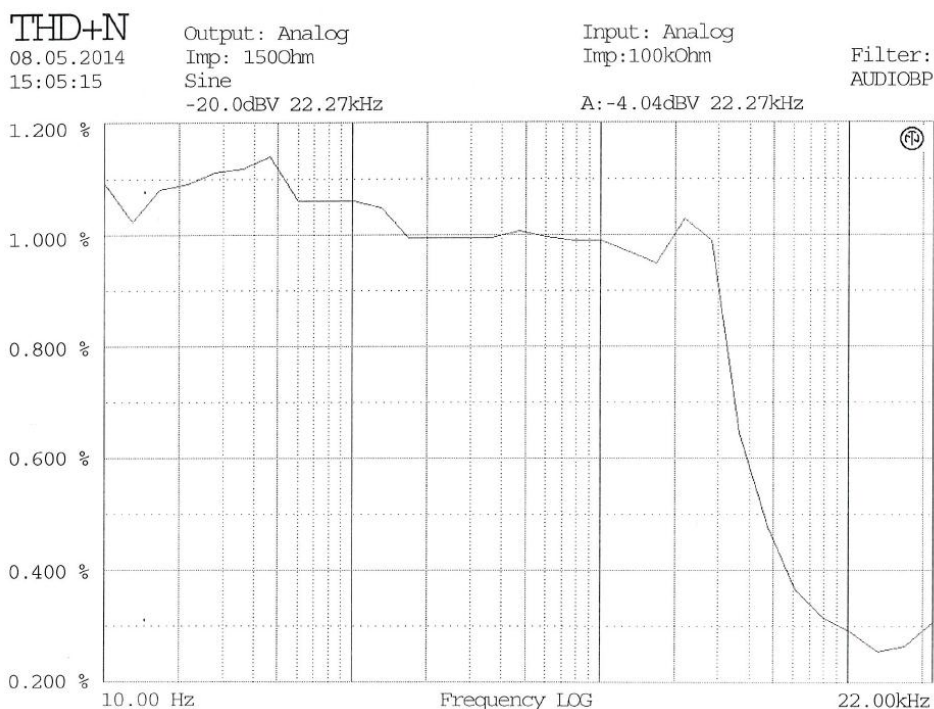
Kuva 20. Transient-mittauksen FFT-muunnos.

100 kHz:n kohdalla on selvästi havaittavissa viiva, johon syyllinen on vahvistin-IC. 220 kHz:n kohdalla on havaittavissa myös tehokomponentti. Virtalähteenä käytetyllä

hakkuriteholähteellä ei ollut juurikaan vaikutusta lähtöön, sillä samat tulokset saatiin myös laboratorion virtalähteellä.

## 5.2 THD+N

*THD+N*-, kohina-, amplitudivaste ja vaihevastemittauksia varten vahvistin kytkettiin synteettiseen kuormaan ja toista ulostuloa mitattiin maata vasten audioanalysaattorilla laboratoriossa. Kuvassa 21 on esillä *THD+N*-mittaus.



Kuva 21. *THD+N*-mittaus.

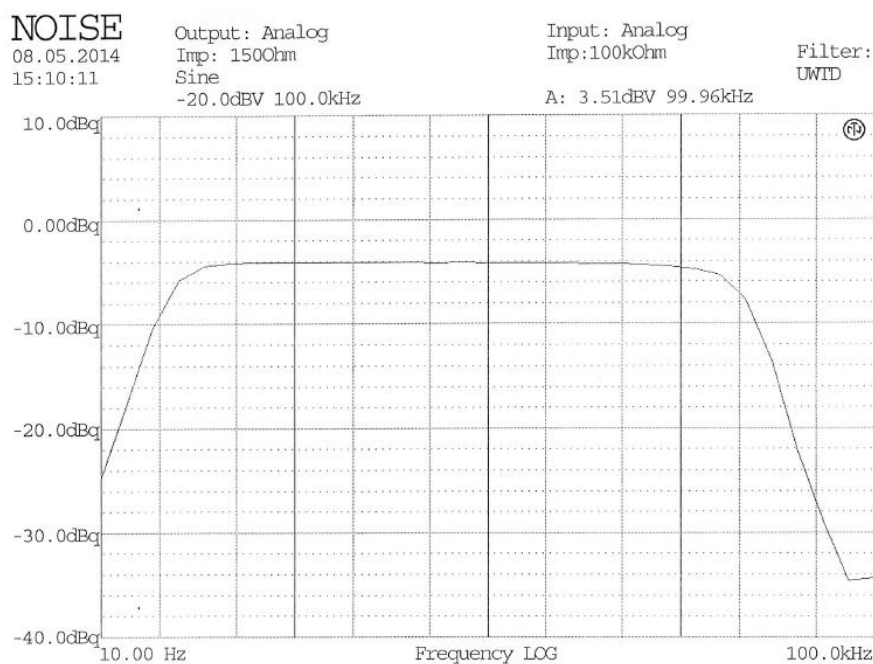
Datalehdellä vahvistinpiirille lupailtiin 0,1–0,3 % *THD*-arvoa, mutta mittauksissa päästiin vain 1 % kokonaisharmoniseen säröön. Spektrissä näkyi 100 kHz:n kohdalla vahvistimelta tullut signaali, joka sekoitti mittauksia. Lähdon *LC*-suodattimen rajataajuus on 50 kHz, mutta ilmeisesti vaimennus ei ollut riittävän jyrkkä kokonaan häivyttääkseen häiritsevää signaalia. Tässä mittauksessa käytettiin analysaattorin äänialueen kaistanpäästösuodatinta, jonka takia *THD*-käyrä lähtee laskeutumaan korkeammilla taajuuksilla. Kuuntelutestissä vahvistimelta otetusta äänestä ei ollut havaittavissa säröytymistä.

Piilevä epäily oli, että vahvistimen toiminnassa yhä jokin häiritsi mittauksia, eikä arvo ole signaalin laadun todellista laatua kuvaava.



Piirilevylle olisi kenties voinut asettaa mahdollisuuden vaihtaa piirin modulaatiotapaa vaihtamalla *MODSEL*-nastaa käyttöjännitteen ja maan välillä, jolloin oltaisiin nähty sen vaikutus *THD*-mittauksiin.

### 5.3 Kohina

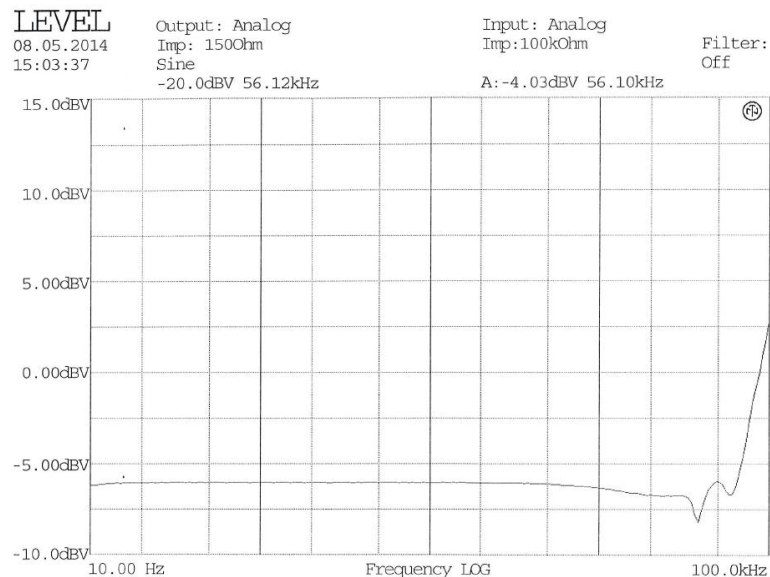


Kuva 22. Kohinamittaus.

Kuvassa 22 on vahvistimen ulostulosta mitattu kohina. *THD+N*-mittauksen korkeaan arvoon vaikutti luultavasti korkea kohinataso. Audioanalyssaattorissa oli mittauksessa audioalueen kaistanpäästösuodatin käytössä. Audioalueen ulkopuolelta nähdäänkin, että kohinataso alkaa nopeasti laskea. Vaikuttavia tekijöitä *THD*- ja kohinamittauksien tuloksiin voisivat kenties olla *LC*-suodattimen kelat, vahvistimen toiminnan aiheuttamat häiriöt ja layoutin ratkaisut. Esimerkiksi IC suositellaan juottamaan myös pohjastaan kiinni maatasoon, mikä ei onnistunut laboratorion välineillä. Ongelma voi olla juuri maadoituksessa, kenties äänilähteen ja teholähteen maadoitukset aiheuttavat häiriötä. Paremmalla aikataululla lähtöön olisi voitu ehkä rakentaa parempi alipäästösuodatin, ainakin mittauksia varten, jotta olisi nähty sen vaikutus tuloksiin.

## 5.4 Amplitudivaste

Kuvassa 23 on vahvistimen amplitudivaste. Vahvistus on suora koko audioalueella, kunnes 50 kHz:n kohdalla alkaa laskeutua. 100 kHz:n kellosignaali näkyy häiriönä kuvassa ylätaajuuksilla.

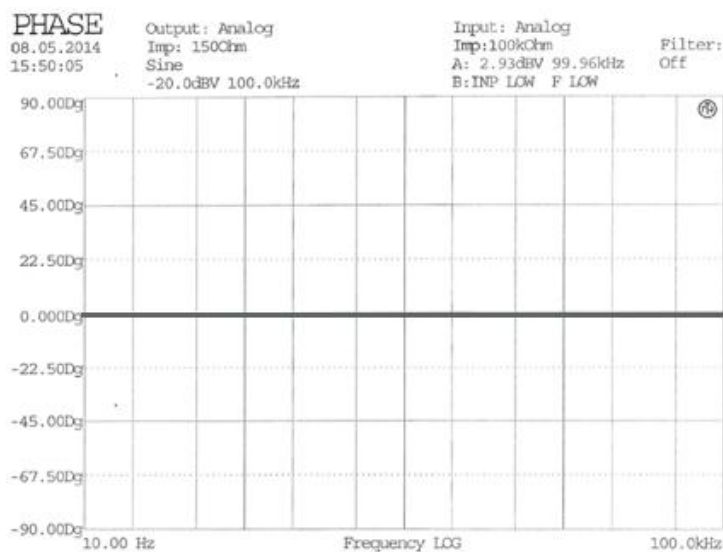


Kuva 23. Vahvistimen amplitudivaste.

## 5.5 Vaihevaste

Kuvasta 24 nähdään, että vahvistimen vaihevaste on suora kaikilla mitatuilla taajuuksilla. Vaihevastetta kuvaavaa suoraa kuvan keskellä on jälkikäteen vahvennettu näkyyden parantamiseksi.

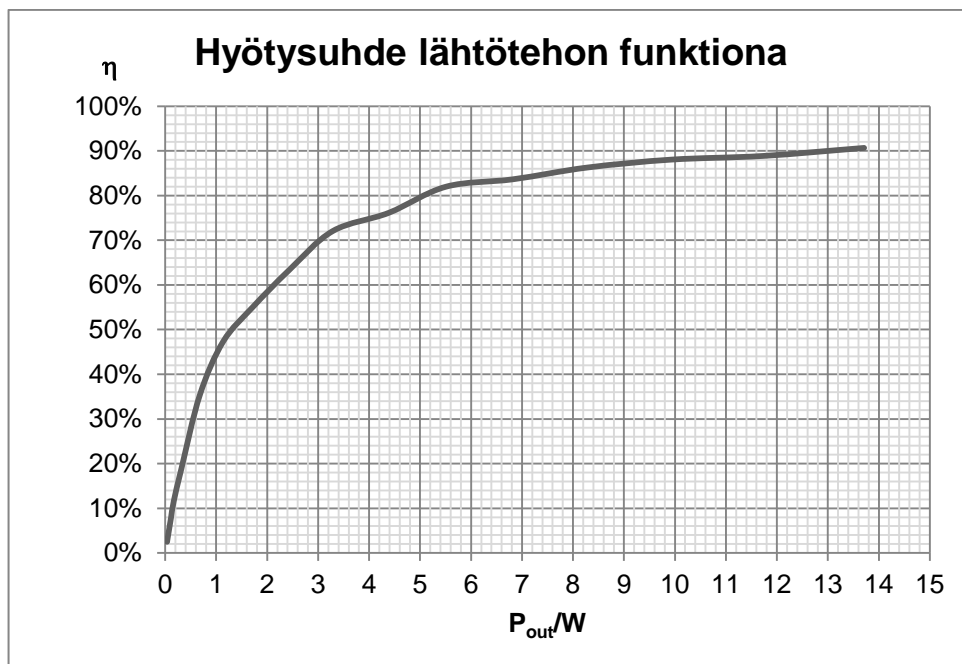




Kuva 24. Vahvistimen vaihevaste.

## 5.6 Hyötysuhdemittaus

Toteutettiin vielä hyötysuhteen mittausta (kuva 25). Virtalähteenä käytettiin laboratoriovirtalähdettä, 24 V:n tasajännitteellä. Virtalukema taltioitiin virtalähteen mittarilta, ja kuorman ( $6\ \Omega$ ) jännitteen tehollisarvo katsottiin oskilloskoopilta RMS-toimintoa käyttäen. Tällä tavoin päästiin mittaamaan vain noin 14 W:n lähtötehoon asti, kunnes virtalähde alkoi rajoittaa toimintaansa. Hakkuriteholähteellä tehoa kuormaan saatiin ainakin 50 W, mutta virtamittaria ei saatu lähteen kanssa sarjaan. Hyötysuhdemittauksissa päästiin kuitenkin yli 90 %:n. Suuremmalla teholla olisi voitu päästä vielä hieman korkeammalle, mutta muuten mittaustulos oli samansuuntainen datalehden mittausten kanssa. Hyötysuhde lasketaan lähtötehon suhteena ottotehoon.

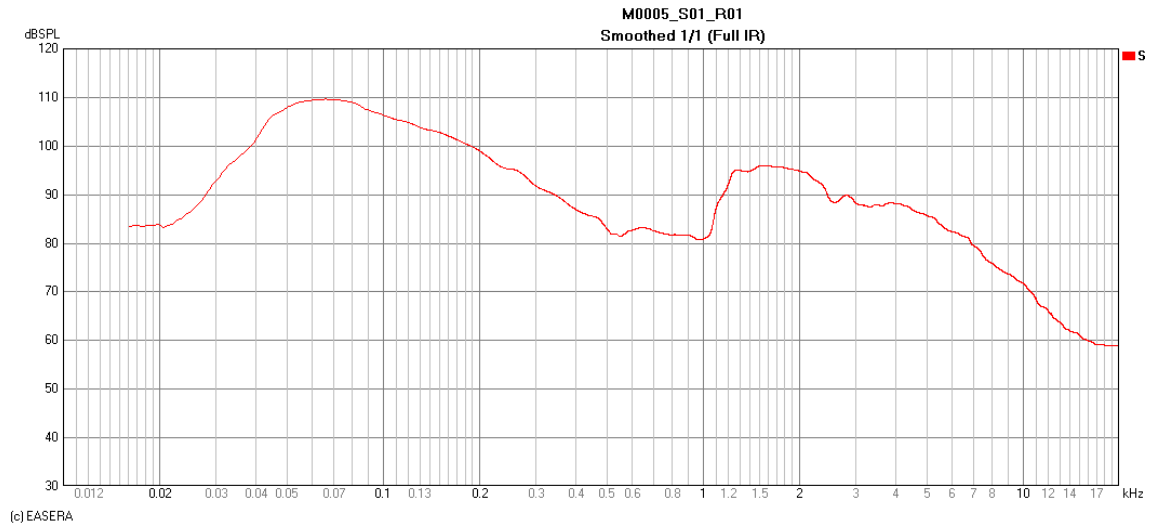


Kuva 25. Hyötysuhde lähtötehon funktiona

Kuvasta 25 voidaan todeta, että vahvistimen hyötysuhde ei hyvin pienellä teholla ole kovinkaan korkea, mutta nousee nopeasti. 1 W:n tehoa lähestyttäessä hyötysuhde on jo yli 40 %. Jos vahvistimelta saatava suurin teho olisi aiemmin mainittu 60 W, 10 % lähtöteholla hyötysuhde olisi jo yli 80 %. Kuvan 5 A- B- ja D-luokan vertailussa esimerkiksi B-luokan vahvistimen hyötysuhde oli 10 % teholla vain n. 28 %.

### 5.7 Subwooferin vaste

Audioanalysaattorilla tehtyjen mittausten jälkeen vahvistin kytkettiin subwooferiin, ja ääntä mitattiin laboratorion äänihuoneen mikrofoniin ja ohjelmistolla (kuva 26).



Kuva 26. Subwooferin ja vahvistimen mitattu taajuusvaste.

Kuvasta 26 nähdään, että subwooferin paras äänentoistoalue on sama kuin kuvan 9 mittaustuloksessa, 50–90 Hz:n alueella. Samoin vastekäyrä laskee jyrkästi 1 kHz:iin tultaessa. Sen jälkeen vastekäyrän nousu saattaa johtua resonoivasta refleksiputkesta. Subwooferin käyttöalue on kuitenkin matalilla taajuuksilla, joten ylempien taajuuksien ominaisuuksilla ei ole merkitystä. Kuvassa 27 on valmis kaiutin.



Kuva 27. Subwoofer kotikäytössä.

Kuvasta voidaan todeta, että asennus koteloon onnistui. Vahvistin kiinnitettiin 3 ruuvilla. Muoviin porattiin reiät kiinnitysruuveille ja ledin kohdalle, tarkoituksena asettaa reikään muovinen valonjohdin. Ääni- ja virtaliittimelle tehtiin reiät takareunaan. Virtakytkin asennettiin kotelon yläreunaan. Elementiltä tulevat johdot juotettiin vahvistimen lähtöihin.

Kaiuttimen teho kotikäytössä oli varsin riittävä eikä äänenlaadussa ollut moittimista. Ainoa moitittava osa laitteistossa oli ostettu teholähde. Vahvistimen lähtöasteen ollessa päällä hakkurilta oli selvästi kuultavissa korkeataajuisia ininää.

## 6 YHTEENVETO

Opinnäytetyö tehtiin, jotta saataisiin kotiaänentoiston täydennykseksi aktiivinen subwoofer. Elektroniikkaliikkeissä myytävät aktiiviset subwooferit ovat useat melko hintavia, mutta toki tehokkaitakin. Varastoon jääneen pienen kaiuttimen ajateltiin olevan sopiva bassontoistoon kerrostaloasunnossa.

Kokemusta audiovahvistimien suunnittelusta ja rakentamisesta ei juuri ollut, muuta kuin koulussa opitut transistoriasteiden ja audiotekniikan perusteet. Taustatietoa etsittäessä päädyttiin D-luokan vahvistimeen. Internetissä useat käyttäjät olivat rakentaneet toimivan näköisiä ja kompakteja piirilevyjä, ja projekti alkoi hahmottua.

Vaikka työ tuli omaan henkilökohtaiseen tarpeeseen, päästiin tutustumaan niihin vaiheisiin, joita työelämässäkin saattaisi tulla vastaan. Piti valita piirilevyn komponentit, suorittaa simulointi, tehdä piirilevypiirros, ja tilata valmistajalta levyt.

Huolellisella työskentelyllä piirilevyohjelman kanssa päästiin hyvään lopputulokseen, sillä kytkentä toimi hyvin ilman suurempia korjauksia.

Vahvistimen olisi kenties voinut rakentaa monimutkikkaammaksi, enemmän valmistajan evaluointipiirilevyn tapaiseksi, jolloin voitaisiin käyttää yhtä tai kahta kanavaa, tai säätää muita asetuksia esimerkiksi jumpperilla. Näin piirilevyä voisi helposti käyttää kaikenlaisiin äänentoistotarkoituksiin.

Audiomittaukset eivät olleet aivan niin hifi-laatua, kuin toive oli. Vahvistinta olisi voinut ehkä yrittää mitata vielä esimerkiksi kunnollisen alipäästösuodattimen kanssa, jotta kaikki mahdolliset häiriöt olisi saatu eliminoidua. Äänenlaadusta häiriöitä matalilla taajuuksilla ei kuitenkaan kotikäytössä havaittu ja sointi oli miellyttävää. Lopulta päästiin toivottuun tulokseen, eli turhaan lattialla lojunut kaiutin saatiin kunnolliseen käyttöön, ja vielä omalla työllä.

## LÄHTEET

- [1] Wikipedia, Amplifier, [www-dokumentti], saatavilla: [en.wikipedia.org/wiki/Amplifier](http://en.wikipedia.org/wiki/Amplifier) (Luettu: 7.3.2014)
- [2] Gaalas, E., Analog Devices, Class D Audio Amplifiers: What, Why, and How [www-dokumentti], saatavilla: [http://www.analog.com/library/analogdialogue/archives/40-06/class\\_d.pdf](http://www.analog.com/library/analogdialogue/archives/40-06/class_d.pdf) (Luettu 11.3.2014)
- [3] Wikipedia, Crossover distortion, [www-dokumentti], saatavilla: [http://en.wikipedia.org/wiki/Crossover\\_distortion](http://en.wikipedia.org/wiki/Crossover_distortion) (Luettu: 17.3.2014)
- [4] Moreno, S. & Elliott, R., Elliott sound products, Class D Audio Amplifiers - Theory and Design, <http://sound.westhost.com/articles/pwm.htm> (Luettu: 17.3.2014)
- [5] Wikipedia, Subwoofer, [www-dokumentti], saatavilla: <http://en.wikipedia.org/wiki/Subwoofer> (Luettu: 17.3.2014)
- [6] Mundy, L., Shavano music online, Adding subwoofers to your PA system, [www-dokumentti], saatavilla: <http://www.colomar.com/Shavano/subs.html> (Luettu: 17.3.2014)
- [7] Texas Instruments, TPA3116D2,TPA3118D2,TPA3130D2 datasheet, [www-dokumentti], saatavilla: <http://www.ti.com/product/tpa3118d2>